

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-115-124

Севостьянов М.В., Сеница Е.В., Уральский А.В., Шарпеткин Е.А., *Бабуков В.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: babukov-v@mail.ru

ВИБРО-ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ АГРЕГАТЫ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье рассмотрена проблема комплексной переработки техногенных анизотропных материалов. Определено направление производственной деятельности, которое требует создания специального оборудования селективного воздействия на каждом этапе технологического процесса. Представлено описание устройств агрегатов, имеющих базовую кривошипно-ползунную схему работы механизма для выполнения различных технологических функций: измельчение, классификация, тонкий и сверхтонкий помол, гомогенизация, агломерация и др. Приведена краткая характеристика патентозащищенных конструкций вибро-центробежных агрегатов: центробежный помольно-смесительный агрегат, центробежный агрегат с параллельными помольными блоками, вибрационно-центробежный гранулятор, вибро-центробежный агрегат комбинированного действия. Рассмотрены конструктивные особенности вибро-центробежного агрегата комбинированного действия, предназначенного для комплексной переработки техногенных волокнистых материалов двумя способами. Подробно описан один из разработанных технологических вариантов реализации вибро-центробежного комбинированного воздействия на материал, при котором по схеме реализации одноветвевое последовательно выполняются процессы дезагломерации техногенных волокнистых материалов в первой камере, измельчение и смешение компонентов композиционной смеси во второй камере и микрогранулирование смеси с фиброаппендерами в третьей камере. Представлены результаты анализ кинематической схемы базового кривошипно-ползунный механизма и получена система уравнений для определения функций положения точек звеньев механизма, с учетом которых определены характеристики скоростных и силовых параметров в отдельных узлах агрегата. Получены аналитические выражения для расчета потребляемой мощности привода вибро-центробежного агрегата комбинированного действия. С учетом выявленных преимуществ вибро-центробежного агрегата определены направления его использования для комплексной переработки техногенных материалов.

Ключевые слова: техногенные материалы, многофункциональные агрегаты вибро-центробежного типа, кривошипно-ползунный механизм, кинематический анализ, кинематические и энергосиловые параметры.

Введение. Проблема комплексной переработки и утилизации техногенных материалов, защиты окружающей среды от загрязнений становится одной из важнейших проблем не только для нашей страны, но и для других промышленно развитых стран, которую должно решать человечество в XXI в. Ежегодно на территории РФ образуется около 6 миллиардов тонн техногенных материалов, из которых порядка 40 миллионов тонн – это твердые коммунальные отходы. Причем, только 4–5 % вовлекаются в переработку [1].

В мире насчитывается более 1000 наименований техногенных продуктов, перспективных для применения в виде вторичного сырья. Из этого количества 700 наименований включены в банки данных как предмет использования, но лишь 60 из них утилизируются тем или иным способом. В то же время, огромный объем техногенных материалов является неиспользуемым потенциалом ресурсо-энергосбережения каждого промышленно-развитого государства [2].

Особое место при этом занимает группа техногенных волокнистых материалов (ТВМ), характеризующихся анизотропной текстурой; малой насыпной плотностью и сыпучестью, повышенной влагоемкостью, склонностью к слеживаемости, повышенным коэффициентом трения и другими физико-механическими характеристиками, усложняющими их переработку (классификацию, измельчение, смешение, транспортировку и др.). К числу ТВМ относятся: базальтоватные и целлюлозно-бумажные отходы; отходы вермикулитового производства (гидрослюды) и химической промышленности, агропромышленного комплекса и др. Переработка указанных материалов требует создания специального оборудования селективного воздействия на каждом этапе технологического процесса [3–6].

Материалы и методы. С учетом актуальности решения вышеуказанных задач на кафедре ТКММ БГТУ им. В.Г. Шухова разработана серия агрегатов вибро-центробежного типа многофункционального действия. Каждый из агрега-

тов имеет конструктивно-технологические особенности, обеспечивающие выполнение поставленной задачи.

Так, центробежный помольно-смесительный агрегат [7] предназначен для тонкого и сверхтонкого измельчения сыпучих материалов с различными физико-механическими характеристиками. Данный агрегат обеспечивает селективное динамическое воздействие мелющих тел на материал за счет различных траекторий движения помольных камер.

Дальнейшим совершенствованием данного агрегата стало создание центробежного агрегата с параллельными помольными блоками [8, 9], что позволило существенно повысить производительность при тех же энергозатратах.

Основываясь на базовом кривошипно-ползунном механизме агрегата для тонкого измельчения материала, был разработан вибрационно-центробежный гранулятор [10]. Агрегат предназначен для гранулирования композиционных материалов с различными физико-механическими характеристиками, в том числе с низкой насыпной плотностью ($\rho_0 \leq 600 - 800 \text{ кг/м}^3$).

На этой же базе разработан и вибро-центробежный агрегат комбинированного действия, предназначенный для комплексной переработки техногенных волокнистых материалов и выполнения различных технологических операций.

Для обеспечения стабильных динамических режимов работы агрегатов разработаны технические устройства для автоматизированного управления технологическими процессами. [11, 12]

Каждая из разработанных конструкций ВЦА выполняет свои технологические функции за счет конструктивных особенностей и организации технологического процесса.

В качестве примера, рассмотрим конструктивные особенности и принцип действия ВЦА КД [13]. Вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия реализует следующие технологические процессы: дезагломерацию волокнистых материалов, например, базальто-волокнистых отходов или целлюлозно-бумажных отходов; классификацию; измельчение отдельных компонентов композиционной смеси, а также, ее гомогенизацию; получение фиброполнителей в виде отдельных фибр или высококонцентрированных микрогранул.

Кроме того, использование последовательно или параллельно расположенных камер при обеспечении их герметичности позволяют осуществлять в них процессы пароувлажнения, сушки, вакуумирования и другие операции.

По схеме агрегата рис. 1 предусмотрена переработка ТВМ способом дезагломерации в верхней камере и микрогранулирования в нижней. Во втором варианте рис. 2 используется средняя камера для механоактивации, классификации или смешения материалов.

Верхняя камера выполнена призматической формы. Внутри камеры закреплены гирляндные цепные завесы. Верхние цепные завесы подпружинены по вертикали с помощью прорезиненных валиков, расположенных в их центральной части. Нижняя камера для переработки материала составлена из двух сопряженных в центре цилиндрических камер, ограниченных со стороны загрузки перегородками с загрузочными спиралевидными устройствами, а в центральной части – выгрузочными решетками. Кроме того, в цилиндрических камерах расположены мелющие тела.

Согласно схеме агрегата на рис. 2, устройство для получения фиброполнителей содержит две камеры для переработки ТВМ и камеру микрогранулирования. Камера микрогранулирования, с загрузочным отверстием по центру и двумя выгрузочными отверстиями по краям, содержит по своему периметру прорезиненные вставки в виде усеченных конусов, направленных большими основаниями от центра в стороны выгрузки.

При необходимости переработки более плотных или слежавшихся ТВМ в обоих вариантах устройств прорезиненные валики могут быть соединены с виброустройствами [13].

Основная часть. Вышеуказанные конструкции ВЦА представляют кривошипно-ползунные механизмы, в которых функции кривошипа выполняет звено АВ, элемент ползуна С. Кинематическая связь звеньев кривошипа АВ и ползуна С выполняет рама (шатун), на которой закреплены рабочие камеры. Разработанные ВЦА имеют общую кинематическую схему (рис. 3), расчет которой сводится к следующему.

Проведенный анализ кинематической схемы механизма позволил получить систему уравнений для определения функций положения точек звеньев механизма, в которых закреплены рабочие камеры, в системе координат X_0Y_0 , связанной со стойкой O .

Для точки C :

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_0 + l_2 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) = 0, \\ l_1 \sin \varphi_0 + l_2 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) = y_c, \end{cases} \quad (1)$$

где y_c – координата точки C , м; l_1 и l_2 – длины звеньев 1 и 2, м; φ_0 – угол поворота входного звена 1, град.; φ_1 – угол поворота звена 2 относительно звена 1, град.

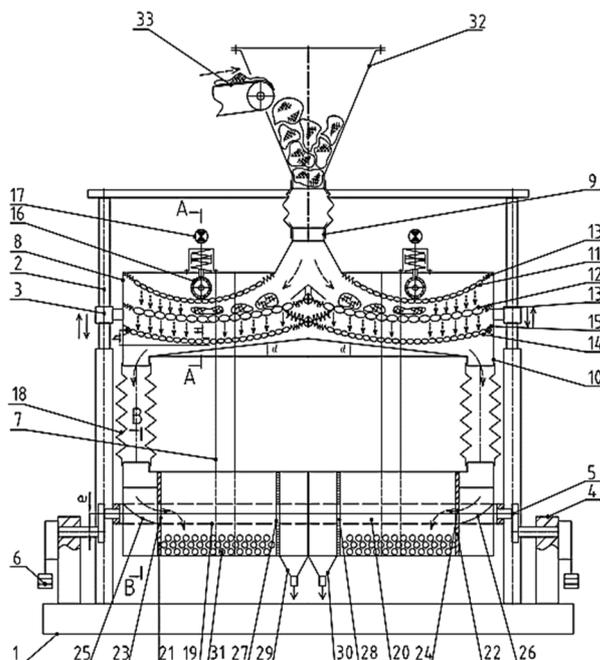


Рис. 1. Вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия с двумя камерами:
 1 – станина; 2 – вертикальные направляющие;
 3 – ползуны; 4 – опорные стойки; 5 – эксцентриковый вал; 6 – противовесы; 7 – рама; 8 – камера дезагломерации; 9 – загрузочное отверстие; 10 – выгрузочные отверстия; 11, 12, 14 – гирляндные цепные завесы; 13 – пружинные амортизаторы; 15 – крепление цепных завес; 16 – прорезиненные валики; 17 – виброустройства; 18 – гофрированные патрубки; 19, 20 – нижняя камера; 21, 22 – перегородки; 23, 24 – загрузочные отверстия; 25, 26 – загрузочные спиралевидные устройства; 27, 28 – выгрузочные решетки; 29, 30 – выгрузочные отверстия; 31 – мелющие тела; 32 – бункер; 33 – ленточный транспортер

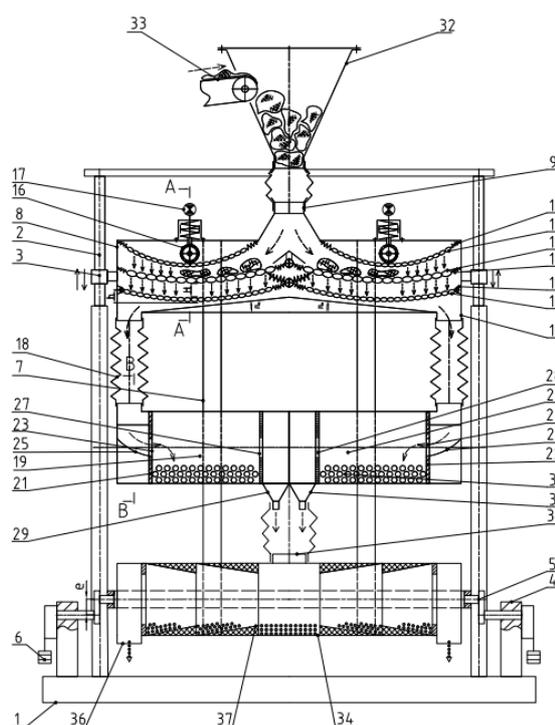


Рис. 2. Вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия с тремя камерами:
 1 – станина; 2 – вертикальные направляющие;
 3 – ползуны; 4 – опорные стойки;
 5 – эксцентриковый вал; 6 – противовесы;
 7 – рама; 8 – камера дезагломерации;
 9 – загрузочное отверстие; 10 – выгрузочные отверстия; 11, 12, 14 – гирляндные цепные завесы; 13 – пружинные амортизаторы; 15 – крепление цепных завес; 16 – прорезиненные валики; 17 – виброустройства; 18 – гофрированные патрубки; 19, 20 – нижняя камера; 21, 22 – перегородки; 23, 24 – загрузочные отверстия; 25, 26 – загрузочные спиралевидные устройства; 27, 28 – выгрузочные решетки; 29, 30 – выгрузочные отверстия; 31 – мелющие тела; 32 – бункер; 33 – ленточный транспортер; 34 – камера микрогранулирования; 35 – загрузочное отверстие; 36 – выгрузочные отверстия; 37 – прорезиненные вставки

Для дальнейших преобразований необходимо учесть, что

$$\varphi_1 = \frac{5}{2}\pi - (\varphi_0 + \varphi_2), \quad (2)$$

$$\varphi_2 = -\arcsin \frac{l_1 \cos \varphi_0}{l_2}, \quad (3)$$

где φ_2 – угол поворота звена 3 относительно звена 2, град.

Для точки К получим зависимости изменения координат точки К

$$\begin{aligned} x_K &= x_K(\varphi_0), \quad y_K = y_K(\varphi_0): \\ l_1 \cos \varphi_0 + l_K \cos(\varphi_0 + \varphi_1) &= x_K, \quad (1.4) \\ l_1 \sin \varphi_0 + l_K \sin(\varphi_0 + \varphi_1) &= y_K, \end{aligned}$$

где l_K – расстояние от точки В до точки К вдоль звена 2, м.

Получаем функции положения:

точки С:

$$y_C = l_1 \cdot \sin \varphi_0 + \sqrt{l_2^2 - (l_1 \cdot \cos \varphi_0)^2}. \quad (5)$$

точки К:

$$x_K = l_1 \cos \varphi_0 + l_K \cos(\varphi_0 + \varphi_1) \quad (6)$$

$$y_K = l_1 \sin \varphi_0 + l_K \sin(\varphi_0 + \varphi_1);$$

точки В, совершающей движение по окружности:

$$x_B = l_1 \cos \varphi_0; \quad (7)$$

$$y_B = l_1 \sin \varphi_0.$$

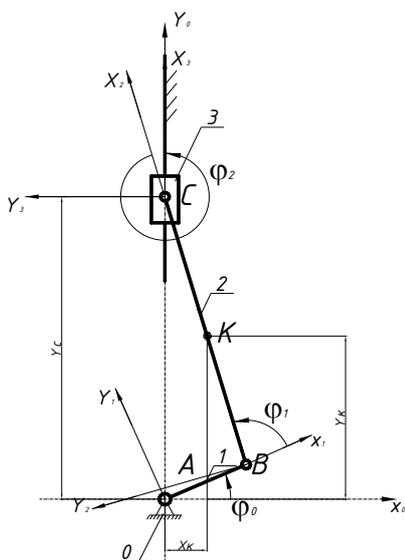


Рис. 3. Расчетная схема кривошипно-ползунного механизма

С целью установления рациональных соотношений длин звеньев рычажного механизма введем коэффициент ν относительной длины шатуна

$$\nu = \frac{l_2}{l_1} \quad (8)$$

Обозначив величину эксцентриситета $l_1 = e$, выражения (5), (6), запишем в следующем виде:

$$y_c = e(\sin\varphi_0 + \sqrt{\nu^2 - \cos^2\varphi_0}); \quad (9)$$

$$x_k = e[\cos\varphi_0 + \xi\nu\cos(\varphi_0 + \varphi_1)]; \quad (10)$$

Используя полученные аналитические зависимости, проводим кинематический расчет ВЦА с определением величины перемещений, скоростей и ускорений центров звеньев. Исходными данными для кинематических расчетов являются конструктивные параметры экспериментального образца ВЦА, для которого величина эксцентриситета вала $e = 0,02$ м; коэффициент смещения средней камеры $\xi = 0,5$; коэффициент относительной длины шатуна $\nu = 33$. Угловая скорость эксцентрикового вала постоянна и равна $\omega = 40$ с⁻¹. Использовались также результаты теоретических исследований агрегатов подобного кинематического типа [14–17].

Проведенный нами кинематический расчет параметров агрегата позволил определить характер скоростных и силовых параметров в отдельных узлах агрегата для расчета потребляемой мощности привода ВЦА.

Рассматривались условия действия силовых нагрузок на кинематические звенья и узлы ВЦА для дезагломерации ТВМ и гранулообразования композиционной смеси (рис. 4).

В данном случае изучался один из указанных технологических вариантов реализации

ВЦА, в котором при одновальевом варианте реализуются последовательно процессы дезагломерации ТВМ в первой камере, измельчение и смешение компонентов композиционной смеси во второй камере и микрогранулирование смеси с фиброаппенителями в третьей камере.

На кинематические звенья ВЦА воздействуют следующие усилия. На ползуны верхней камеры дезагломерации А: силы тяжести камеры дезагломерации и ее рабочих элементов \bar{G}_{01} ; сила нормального давления \bar{N} ползунов на направляющие камеры дезагломерации и сила инерции \bar{F}_{01y}^u верхней камеры. На кинематическое звено O_1O_3 – шатун в его центральной части (камеру измельчения – смешения В): сила тяжести камеры с мелющей загрузкой G_{02} , силы инерции по оси X – \bar{F}_{02x}^u и оси Y – \bar{F}_{02y}^u . На камеру гранулирования С, расположенную в нижней части шатуна O_1O_3 и соединенную с кривошипом O_2O_3 : сила тяжести \bar{G}_{03} и сила инерции \bar{F}_{03}^u . В точке опоры эксцентрикового вала \bar{R}_{0x} и \bar{R}_{0y} и крутящий момент $M_{эксц}$, передаваемый эксцентриковым валом. В точке расположения контргрузов (противовесов) O_4 : сила тяжести контргруза $\bar{G}_{к.гр.}$ и сила инерции \bar{F}_{04}^u .

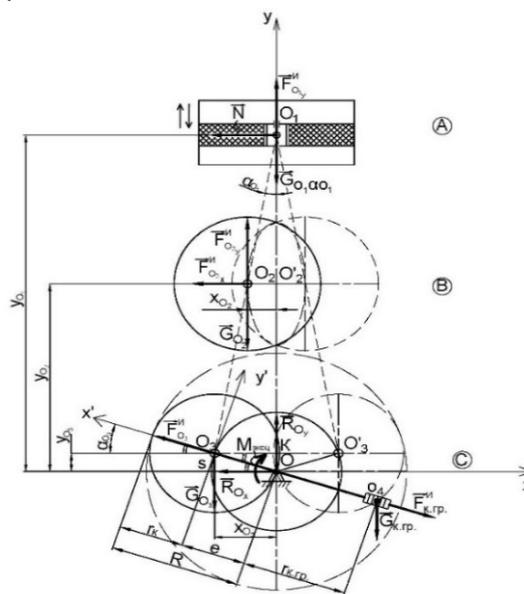


Рис. 4. Схема воздействия силовых нагрузок на кинематические звенья и узлы вибро-центробежного агрегата

Для определения мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления в кинематических звеньях, узлах и системе контргрузов ВЦА, используем метод определения приведенных моментов, заключающийся в равенстве мощностей, развиваемых приведенным моментом и моментами, возникающими от действия сил тяжести, инерции и других, приложенных к звеньям агрегата [18–19].

$$N_{пр} = \sum_i^n N_i = \sum_i^n G_i F_i U_i \cos\alpha_i + \sum_i^n M_i \omega_i \quad (11)$$

где F_i – сила, приложенная к звену i , Н; M_i – момент, приложенный к звену i , Н·м; U_i – скорость движения точки приложения силы G_i (F_i), м/с; α_i – угол, образованный между векторами силы (G_i) F_i и скорости U_i , град.; ω_i – угловая скорость i -го кинематического звена, рад/с.

При определении мощности (11) массу ползунов и перерабатываемых в камерах материалов, в силу их незначительных величин по сравнению с рабочими элементами агрегата (подвижной рамы с тремя камерами, эксцентриковым валом, контргрузом и др.), не учитываем. Для удобства расчетов силы тяжести рамы и эксцентрикового вала приведены к соответствующим силам

$$N_{пр} = (\bar{G}_{01}V_{01} \cos \alpha_{1i} + \bar{F}_{01y}^u V_{01} \cos \alpha_{2i} + \bar{G}_{02}V_{02} \cos \alpha_{3i} + \bar{F}_{02}^u V_{02} \cos \alpha_{4i} + \bar{G}_{03}V_{03} \cos \alpha_{5i} + \bar{F}_{03}^u V_{03} \cos \alpha_{6i} + M_{эксц} \omega_{эксц} + 2\bar{G}_{к.гр.} V_{к.гр.} \cos \alpha_{7i} + 2\bar{F}_{к.гр.}^u V_{к.гр.} \cos \alpha_{8i}), \quad (12)$$

где V_{01}, V_{02}, V_{03} – соответственно, скорости точек (O_1, O_2, O_3) приложения сил тяжести и инерции, м/с; $V_{к.гр.}$ – скорость точки приложения сил тяжести $G_{к.гр.}$ и инерции $\bar{F}_{к.гр.}^u$ контргрузов, м/с; $M_{эксц}$ – момент, приложенный к эксцентриковому валу, Н·м, $M_{эксц} = \omega_{эксц} \cdot g \cdot e$; $\omega_{эксц}$ – угловая скорость вращения эксцентрикового вала, рад/с; $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, \alpha_{3i}, \alpha_{4i}, \alpha_{5i}, \alpha_{6i}, \alpha_{7i}, \alpha_{8i}$ – соответственно, углы между векторами силовых нагрузок (G_i, F_i) и их скоростей (V_i) в точках приложения центров масс, град.

Рассмотрим схему воздействия силовых нагрузок (рис. 4) для определения параметров выражения (12). При этом, используя принцип Даламбера, считаем, что механическая система будет уравновешенной, если к существующим активным силам и реакциям связи будут приложены силы инерции.

Определим координаты точек приложения силовых нагрузок. Положение камер ВЦА определяет углом α_{03} (в системе координат XOY) при вращении точки O3 по круговой траектории во-

тяжести камер дезагломерации, измельчения – смешения и гранулирования. Силовые нагрузки от действия веса звеньев O_1O_3 и O_3O_4 не учитываем ввиду их незначительных величин. Силы трения при перемещении ползунов в направляющих камеры дезагломерации также не значительны, $F_{тр} = N \cdot f_{тр} - \min$.

Согласно приведенной одноветвевой кинематической схеме ВЦА и указанных силовых нагрузок (рис. 4) аналитическое выражение для определения потребляемой мощности привода имеет вид:

круг центра O, а также углом α_{01} , при перемещении кинематического звена O_1O_3 – шатуна [14, 20].

Координаты точки O_1 по оси Y получаем из следующих рассуждений.

При рассмотрении ΔO_1SK и ΔOSK имеем

$$O_3K = O_1O_3 \cdot \sin \alpha_{01} = OO_3 \cos \alpha_{03}, \quad (13)$$

или полагая – длины шатуна $Lo_{103} = O_1O_3$ и кривошипа $Lo_{03} = e$, а также $Ke = \frac{e}{lo_{103}}$ – коэффициент отношения длины кинематических звеньев, кривошипа и шатуна, из последнего выражения (13) имеем

$$\sin \alpha_{01} = Ke \cos \alpha_{03} \\ \cos \alpha_{01} = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{01}} = \sqrt{1 - Ke^2 \cos^2 \alpha_{03}}, \quad (14)$$

Тогда координата точки O_1 по оси Y

$$Y_{01} = e \sin \alpha_{03} + lo_{103} \cos \alpha_{01}, \quad (15)$$

Для выражения (11) потребляемой мощности привода скорость перемещения ползуна V_{01} определяются при дифференцировании координаты Y_{01} , по углу поворота кривошипа α_{03} и угловой скорости вращения эксцентрикового вала.

$$V_{01} = Y_{01} = \omega_{эксц} \cdot e (\cos \alpha_{03} + 0,5Ke \sin \alpha_{03}), \quad (16)$$

Сила инерции, действующая на камеру дезагломерации, равна

$$\bar{F}_{01}^u = -m_{AAy}, \quad (17)$$

где m_A – масса камеры дезагломерации, кг;

$$a_{Ay} = V_{01} = Y_{01} = -\omega_{эксц}^2 \cdot e (\sin \alpha_{03} - Ke \cos 2\alpha_{03}), \quad (18)$$

Соответствующие значения координат X_{02}, Y_{02} , скорости V_{02} силы инерции $\bar{F}_{02x}^u, \bar{F}_{02y}^u$ центра

a_{Ay} – ускорение движения камеры дезагломерации, м/с².

Значение a_{Ay} определяем как производную скорости перемещения

O_2 второй камеры («В») ВЦА определяются из выражений:

$$X_{02} = 0,5l \cos \alpha_{03} \\ Y_{02} = e \sin \alpha_{03} + 0,5lo_{103}, \quad (19) \\ V_{02} = X_{02} = -\omega_{эксц} 0,5e \sin \alpha_{03};$$

$$V_{02y} = Y_B = \omega_{\text{эксц}} e (\cos \alpha_{03} + 0,25K_e \sin 2 \alpha_{03}), \quad (20)$$

$$\bar{F}_{02}^u = -m_B a_{Bx}, \quad (21)$$

где m_B – масса второй камеры, кг; a_{Bx} , a_{By} – соответственно ускорение движения второй камеры по осям X и Y , м/с^2 .

Для выражения (21) значения ускорений по соответствующим координатам X и Y будет иметь вид:

$$\begin{aligned} a_{Bx} &= \dot{V}_{02x} = \ddot{Y}_{02x} = -0,5\omega_{\text{эксц}}^2 e \cos \alpha_{03}, \\ a_{By} &= \dot{V}_{02y} = \ddot{Y}_{02y} = -\omega_{\text{эксц}}^2 e (\sin \alpha_{03} - 0,5K_e \cos 2 \alpha_{03}), \end{aligned} \quad (22)$$

Для точек O_3 (нижняя камера) и O_4 (противовес) координаты, соответственно, равны (рис. 4).

$$Y_{04} = -r_{\text{к.гр.}} \sin \alpha_{04}, \quad (23)$$

Тогда окружные скорости для вышеуказанных точек O_3 и O_4 :

$$X_{03} = e \cos \alpha_{03}, Y_{03} = e \sin \alpha_{03};$$

$$X_{04} = -r_{\text{к.гр.}} \cos \alpha_{04};$$

$$V_{03x} = \dot{X}_{03} = \omega \frac{dx_{03}}{d\alpha_{03}} = \omega \cdot \frac{d(e \cos \alpha_{03})}{d\alpha_{03}} = -\omega e \sin \alpha_{03},$$

$$V_{03y} = \dot{Y}_{03} = \omega \frac{d(e \sin \alpha_{03})}{d\alpha_{03}} = \omega \cdot r_{\text{к.гр.}} \cos \alpha_{03}, \quad (24)$$

$$V_{04x} = \dot{X}_{04} = \omega \frac{d(-r_{\text{к.гр.}} \cdot \cos \alpha_{04})}{d\alpha_{04}} = \omega \cdot r_{\text{к.гр.}} \sin \alpha_{04}$$

$$V_{04y} = \dot{Y}_{04} = \omega \frac{d(-r_{\text{к.гр.}} \cdot \sin \alpha_{04})}{d\alpha_{04}} = \omega \cdot r_{\text{к.гр.}} \cos \alpha_{04} \quad (25)$$

Учитывая, что кривошип $OO_3=l$ -эксцентриситет и рычаг противовеса $OO_4=r_{\text{к.гр.}}$ осуществляют равномерное вращательное движение с угловой скоростью $\omega_{\text{эксц.}}$, а силы инерции направлены вдоль линии O_3O_4 , то полагая

$$\bar{F}_i^u = m_i \cdot \frac{v_i^2}{r_i} = m_i (\omega_i \cdot r_i)^2 r_i = m_i \omega^2 r_i,$$

получим значения сил инерции в центрах камеры гранулирования O_3 и противовеса O_4 :

$$\bar{F}_{O3}^u = m_{O3} \omega_{\text{эксц.}}^2 e, \quad (26)$$

$$\bar{F}_{\text{к.гр.}}^u = m_{O4} \omega_{\text{эксц.}}^2 r_{\text{к.гр.}}, \quad (27)$$

где m_{O3} , m_{O4} – массы камеры гранулирования и контргруза, соответственно, кг.

Проведенные комплексные экспериментальные исследования подтвердили адекватность установленных закономерностей.

Так при исходных значениях параметров: масса камер - $m_1=48$ кг, $m_2=42$ кг, $m_3=42$ кг; угловой скорости эксцентрикового вала - $\omega_{\text{эксц.}}=40$ с^{-1} ; величины эксцентриситета вала - $e=0,02$ м; $V_{\text{к.гр.}}=5$ м/с; момент, приложенный к эксцентриковому валу - $M_{\text{эксц.}}=7,8$ Н·м; $\cos \alpha_{01}=0,866$; $\cos \alpha_{02}=0,5$; $\cos \alpha_{03}=-0,5$; $\cos \alpha_{04}=-0,866$; $\cos \alpha_{05}=-0,866$; $\cos \alpha_{06}=-0,5$; $\cos \alpha_{07}=0,5$; $\cos \alpha_{08}=0,866$, а также, согласно выражению, $\bar{G}_i = mg$, получаем значения $\bar{G}_{01}=470,88$ Н; $\bar{G}_{02}=412,02$ Н; $\bar{G}_{03}=412,02$ Н. По формулам (6), (20), (24) получаем значения $V_{01}=-0,38$ м/с, $V_{02}=-0,34$ м/с, $V_{03}=-0,69$ м/с. По формулам (17), (21), (26) и (27) получаем значения

$\bar{F}_{01}^u=1339,39$ Н; $\bar{F}_{02}^u=8$ Н; $\bar{F}_{03}^u=1344$ Н; $\bar{F}_{\text{к.гр.}}^u=196,2$ Н. Согласно выражению (12) получаем значение мощности привода $N=1,1$ кВт.

Выводы. Таким образом, для переработки техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками нами разработаны вибро-центробежные агрегаты различного конструктивного исполнения и технического назначения, выполняющие различные технологические операции со снижением энергозатрат на 20–30 % при их реализации. Данные агрегаты имеют следующие преимущества перед известными конструкциями:

- обладают универсальными технологическими возможностями при базовой кинематической схеме устройства;
- обеспечивают селективное воздействие динамических нагрузок при каждой последовательной стадии переработки материала;
- обладают модульным принципом, позволяющим осуществлять быструю перенастройку агрегата для выполнения различных технологических процессов;
- позволяют реализовать различные технологические процессы на единой конструктивно-технологической основе (деагломерацию ТВМ, измельчение, классификацию, смешение, гранулирование, термо-влажностную обработку, сушку, вакуумирование, экстракцию и другие операции);

• обеспечивают возможность их использования для перспективных технологий: термолитной переработки техногенных материалов, 3D-технологий, получения наноструктурированных композиционных смесей и др.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.11523.2018/11.12

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гринин А.С., Новиков В.Н. Промышленные и бытовые отходы: хранение, утилизация, переработка. Москва: Фаир-пресс, 2002. 336 с.
2. Gurieva V.A., Belova T.C. Structural Features of the Cement-sand Mortar Reinforced with a Modified Basalt Microfiber // *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 150. Pp. 2163–2167.
3. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Popov D.Y., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Textile-reinforced concrete using composite binder based on new types of mineral raw materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2018. 032033.
4. Гурьева В.А., Прокофьева В.В. Строительная керамика на основе композиции техногенного серпентинитового сырья и низкосортных глин // *Строительные материалы*. 2012. №8. С. 20–21.
5. Защепкина К.А. Перспективы применения материалов с добавлением базальтовых волокон и базальтового ровинга // *Наукові нотатки*. 2014. № 45. С. 215–219.
6. Стенин А.А., Лесовик В.С. Композиционные материалы на основе природных армирующих волокон / Сб.: *Современные технологии деревообрабатывающей промышленности // Материалы международной научно-практической онлайн-конференции*. 2018. С. 315–320.
7. Пат. 2277973, Российская Федерация, Помольно-смесительный агрегат / Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Уральский В.И., Сеница Е.В.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; заявитель и патентообладатель ООО «ТК РЕЦИКЛ», №2005118705/03, заявл. 24.06.2005; опубл. 20.06.06, Бюл. №17.
8. Пат. 2381837, Российская Федерация, Помольно-смесительный агрегат / Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Уральский В.И., Уральский А.В., Сеница Е.В. // заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; заявитель и патентообладатель ООО «ТК РЕЦИКЛ». № 2008109444/03, заявл.11.03.2008, опубл. 20.02.2010, Бюл №5.
9. Елисева М.А. Опыт и перспектива применения механоактивации в технологии производства бетонов // *Молодой вчений*. 2015. № 6–1 (21). С. 23–26.
10. Пат. 2412753, Российская Федерация, Вибрационно-центробежный гранулятор / Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Шкарпеткин Е.А., Уральский В.И.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2009135800/05; заявл. 25.09.09; опубл. 27.02.2011, Бюл. №6.
11. Пат. 2494813, Российская Федерация, Помольно-смесительный агрегат с автоматической балансировкой / Глаголев С.Н., Рубанов В.Г., Севостьянов В.С., Уральский В.И., Стативко А.А., Стативко С.А., Бушуев Д.А.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2012117656/13; заявл. 27.04.2012; опубл. 10.10.13, Бюл. №28.
12. Красулин Н.А., Солодов В.С. Гранулирование угольной пыли на виброгрануляторе // Сб. мат-ов X Всероссийской, сб. докл. науч.-практ. конф. молодых ученых с международным участием «Россия молодая». 2018. С. 53305.1–53305.5.
13. Пат. 2692624, Российская Федерация, Устройство и способ переработки волокнистых техногенных материалов для получения фиброаполнителей (варианты) / Севостьянов М.В., Полуэктова В.А., Севостьянов В.С., Сирота В.В., Уральский В.И., Мартаков И.Г., Бабуков В.А.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2018131819; заявл. 03.09 2018, опубл.:25.06 2019, Бюл. № 18.
14. Сеница Е.В., Севостьянов В.С., Уральский В.И., Уральский А.В. Теоретические основы создания центробежных измельчителей с селективным динамическим воздействием на материал. Монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. С. 36–44.
15. Стативко С.А., Рубанов В.Г., Севостьянов В.С., Уральский В.И. Исследование вибрации центробежного помольного агрегата в зависимости от загрузки // *Актуальные проблемы науки: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф.*, (Кузнецк, 30 сент. 2011 г.), Кузнецк: ИП Тугушев С.Ю., 2011.Т.3. С. 99–102.
16. Бушуев Д.А., Воробьев Н.Д., Рубанов В.Г. Анализ динамических нагрузок в подшипниках помольно-смесительного агрегата как объекте автоматизации // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 2. С.143–148.
17. Рубанов В.Г., Севостьянов В.С., Стативко С.А., Бушуев Д.А. Вопросы автоматизации помольно-смесительных агрегатов для получения высокодисперсных материалов // Сб. докл. международной науч. практ. конференции «Инновационные технологии и материалы». Белгород, 11–12 октября 2011 г. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. Ч. 2. С. 215–220.
18. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д, 1999. 621 с.

19. Крейнин Г.В. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 214 с.

20. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высш. шк., 2001. 216 с.

Информация об авторах

Севостьянов Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры Технологические комплексы, машины и механизмы E-mail: msev31@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Синица Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры Технологические комплексы, машины и механизмы E-mail: evsinita@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Уральский Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры Технологические комплексы, машины и механизмы E-mail: alexh_1984.10@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шкарпеткин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры Технологические комплексы, машины и механизмы E-mail: jonick86@inbox.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бабукров Владимир Александрович, аспирант кафедры Технологические комплексы, машины и механизмы E-mail: babukov-v@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в октябре 2019 г.

© Севостьянов М.В., Синица Е.В., Уральский А.В., Шкарпеткин Е.А., Бабукров В.А., 2020

Sevostyanov M.V., Tit E.V., Uralsky A.V., Shkarpetkin E.A., *Babukov V.A.

Belgorod state technological University. V.G. Shukhova,

**E-mail: babukov-v@mail.ru*

VIBRO-CENTRIFUGAL UNITS FOR COMPLEX PROCESSING OF TECHNOGENIC MATERIALS

Abstract. *The article deals with the problem of complex processing of technogenic anisotropic materials. The direction of production activity, which requires the creation of special equipment for selective exposure at each stage of the technological process, is determined. A description of the devices of aggregates that have a basic crank-slide scheme of the mechanism for performing various technological functions is presented: grinding, classification, thin and ultrafine grinding, homogenization, agglomeration, etc. A brief description of patent-protected designs of vibro-centrifugal units is given: centrifugal grinding and mixing unit, centrifugal unit with parallel grinding blocks, vibration-centrifugal granulator, vibro-centrifugal unit of combined action. The design features of the vibro-centrifugal unit of combined action intended for complex processing of technogenic fibrous materials in two ways are considered. One of the developed technological options for the implementation of the vibration-centrifugal combined effect on the material is described in detail, in which, according to the single-branch variant, the processes of deagglomeration of technogenic fibrous materials in the first chamber, grinding and mixing of the components of the composite mixture in the second chamber and micro-granulation of the mixture with fiber fillers in the third the camera. The results of the analysis of the kinematic scheme of the basic crank-slide mechanism are presented and a system of equations for determining the position functions of the points of the mechanism links is obtained, the characteristics of speed and power parameters in individual units of the unit are defined. Taking into account the identified advantages of the vibro-centrifugal unit, the directions of its use for complex processing of technogenic materials are determined.*

Keywords: *technogenic materials, multifunctional units of vibro-centrifugal type, crank-slide mechanism, kinematic analysis, kinematic and power parameters.*

REFERENCES

1. Grinin A.S., Novikov V.N. Industrial and household waste: storage, utilization, processing

[Promyshlennyye i bytovyye othody: hranenie, utilizatsiya, pererabotka.]. Moscow: Fair press, 2002. 336 p. (rus)

2. Gurieva V.A., Belova T.C. Structural Features of the Cement-sand Mortar Reinforced with a Modified Basalt. Microfiber Proceedings Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 2163–2167.

3. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Popov D.Y., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Textile-reinforced concrete using composite binder based on new types of mineral raw materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Pp. 032033.

4. Guryeva V.A., Prokofieva V.V. Construction ceramics based on the composition of technogenic serpentinite raw materials and low-grade clays [Stroitel'naya keramika na osnove kompozicii tekhnogenogo serpentinitovogo syr'ya i nizkosortnyh glin]. Building materials. 2012. No. 8. Pp. 20–21. (rus)

5. Zasyrkina K.A. prospects of application of materials with the addition of basalt fibers and basalt roving [Perspektivy primeneniya materialov s dobavleniem bazal'tovyh volokon i bazal'tovogo rovinga]. Nukov notatki. 2014. No. 45. Pp. 215–219. (rus)

6. Stenin A.A., Lesovik V.S. Composite materials based on natural reinforcing fibers [Kompozicionnye materialy na osnove prirodnyh armiruyushchih volokon] Sb.: Sovremennye tekhnologii derevoobrabatyvayushchej promyshlennosti. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy onlajn-konferencii. 2018. Pp. 315–320. (rus)

7. Gridchin A.M., Sevostyanov V.S., Lesovik V.S., Uralsky V.I., Sinita E.V. Grinding and mixing unit. Patent RF, no. 2277973, 2006. (rus)

8. Gridchin A.M., Sevostyanov V.S., Lesovik V.S., Uralsky V.I., Uralsky A.V., Sinita E.V. Grinding and mixing unit. Patent RF, no. 2381837, 2010. (rus)

9. Eliseeva M.A. Experience and prospects of using mechanical activation in technology of production of concrete [Opyt i perspektiva primeneniya mekhanoaktivacii v tekhnologii proizvodstva betonov]. Molodi scientist. 2015. No. 6–1 (21). Pp. 23–26. (rus)

10. Ilyina T.N., Sevostyanov M.V., Shkarpetkin E.A., Uralsky V.I. Vibration-centrifugal granulator. Patent RF, no. 2412753, 2011. (rus)

11. Glagolev S.N., Rubanov V.G., Sevostyanov V.S., Uralsky V.I., Stativko A.A., Stativko S.A., Bushuev D.A. Grinding and mixing unit with automatic balancing. Patent RF, no. 2412753, 2012. (rus)

12. Krasulin N. A., Solodov V. S. Granulation of coal dust on vibrogranulator [Granulirovanie

ugol'noj pyli na vibrogranulyatore] Sb. mat-ov H Vserossijskoj, sb. dokl. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya». 2018. Pp. 53305.1–53305.5. (rus)

13. Sevostyanov M.V., Poluektova V.A., Sevostyanov V.S., Sirota V.V., Uralsky V.I., Martakov I.G., Babukov V.A. Device and method of processing of fibrous technogenic materials for obtaining fiber fillers (variants). Patent RF, no. 2381837, 2019. (rus)

14. Sinita E.V., Sevostyanov V.S., Uralsky V.I., Uralsky A.V. Theoretical bases of creation of centrifugal grinders with selective dynamic influence on a material [Teoreticheskie osnovy sozdaniya centrobezhnyh izmel'chitelej s selektivnym dinamicheskim vozdejstviem na material. Monografiya]. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2013. Pp. 36–44. (rus)

15. Stativko S.A., Rubanov V.G., Sevostyanov V.S., Uralsky V.I. investigation of vibration of centrifugal grinding unit depending on loading [Issledovanie vibracii centrobezhnogo pomol'nogo agregata v zavisimosti ot zagruzki]. Aktual'nye problemy nauki: sb. dokl. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., (Kuzneck, 30 sent. 2011 g.), Kuzneck: IP Tugushev S.Yu., 2011. Vol. 3. Pp. 99–102. (rus)

16. Bushuev D. A., Vorobiev N. D., Rubanov V. G. Analysis of dynamic loads in the bearings of the grinding and mixing unit as an object of automation [Analiz dinamicheskikh nagruzok v podshipnikah pomol'no-smesitel'nogo agregata kak ob'ekte avtomatizacii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2014. No. 2. Pp. 143–148. (rus)

17. Rubanov V.G., Sevostyanov V.S., Stativko S.A., Bushuev D.A. questions of automation of grinding and mixing units for obtaining highly dispersed materials [Voprosy avtomatizacii pomol'no-smesitel'nyh agregatov dlya polucheniya vysokodispersnyh materialov]. Belgorod, 11-12 October 2011, Belgorod: Publishing house of BSTU. V.G. Shukhov. 2011. CH. 2-P. 215–220. (rus)

18. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology [Osnovy vibracionnoj tekhnologii]. Rostov n/D, 1999. 621 p. (rus)

19. Kreinin G.V. Kinematics, dynamics and accuracy of mechanisms: Handbook [Kinematika, dinamika i tochnost' mekhanizmov: Spravochnik]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 214 p. (rus)

20. Targ S.M. Short course of theoretical mechanics [Kratkij kurs teoreticheskoy mekhaniki]. M.: No. SHK., 2001. 216 p. (rus)

Information about the authors

Sevostyanov, Maxim V. PhD, Associate Professor. E-mail: msev31@mail.ru. Belgorod state technological University. V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Tit, Elena V. PhD, Associate Professor. E-mail: evsinita@mail.ru. Belgorod state technological University. V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Uralsky, Alexey V. PhD, Associate Professor. E-mail: alexx_1984.10@mail.ru. Belgorod state technological University. V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Shkarpetkin, Evgeny A. PhD, Associate Professor. E-mail: jonick86@inbox.ru. Belgorod state technological University. V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Babukov, Vladimir A. Post-graduate Student. E-mail: babukov-v@mail.ru. Belgorod state technological University. V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received in October 2019

Для цитирования:

Севостьянов М.В., Сеница Е.В., Уральский А.В., Шкарпеткин Е.А., Бабуков В.А. Вибро-центробежные агрегаты для комплексной переработки техногенных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 115–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-115-124

For citation:

Sevostyanov M.V., Tit E.V., Uralsky A.V., Shkarpetkin E.A., Babukov V.A. Vibro-centrifugal units for complex processing of technogenic materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 1. Pp. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-115-124